

第7章 操作臂的力控制



CONTROL SCIENCE AND ENGINEERING

SINCE 1956

概述

- 当机械臂在自由空间中跟踪轨迹运动时，采用的是位置控制
- 若机械臂的工作需要末端执行器与工作环境发生接触，则需考虑力控制
- 使用海绵擦窗的操作臂
- 机械臂使用刚性刮削工具从玻璃表面刮油漆
- 主要方法：力位混合控制、阻抗控制
- 应用场景
 - 机械加工（抛光、打磨、去毛刺等）
 - 多机械臂协作
 - 人机协作

力控制应用示例



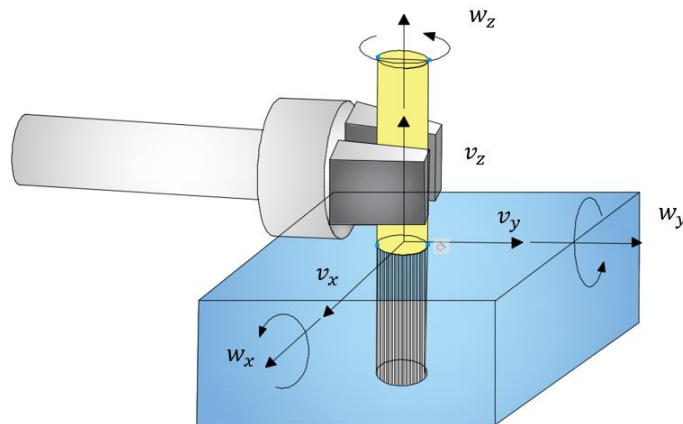
- 对于需要物理交互的任务，需要将期望的运动信号与期望的力信号相结合，来完成目标任务。
- 末端执行器与环境交互的力/力矩可以直接控制，也可以间接地进行限制。

7.1 力位混合控制



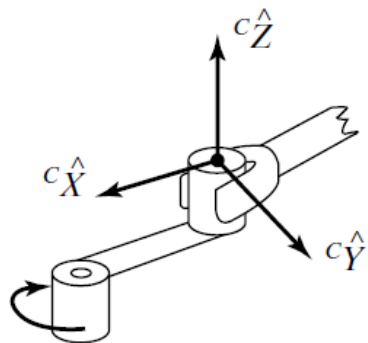
工业机器人在装配作业中的应用

- 零件装配广泛存在于工业生产中，该任务对零件之间的位置精度要求非常高
- 若仅靠位置控制，工业机器人的执行精度不能完成装配
- 当中等刚度的零件相互作用时，相对位置的微小变化会产生很大的接触力
- 测量和反馈控制接触力，可以提高机械臂的位置执行精度，以完成装配



部分约束任务中的控制坐标系

例：摇手柄（**准静态**分析，忽略重力和某些摩擦力），考察对工具末端的约束



约束坐标系{C}是手柄的联体坐标系， \hat{x} 方向指向手柄轴心

➤ **自然约束**（特定接触条件下自然形成，与期望运动无关）

位置约束（以速度形式表示）

力约束

$${}^C v_x = 0$$

$${}^C v_z = 0$$

$${}^C \omega_x = 0$$

$${}^C \omega_y = 0$$

$${}^C f_y = 0$$

$${}^C n_z = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ {}^C v_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ {}^C \omega_z \end{bmatrix} \text{ 正交于 } \begin{bmatrix} {}^C f_x \\ 0 \\ {}^C f_z \\ {}^C n_x \\ {}^C n_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

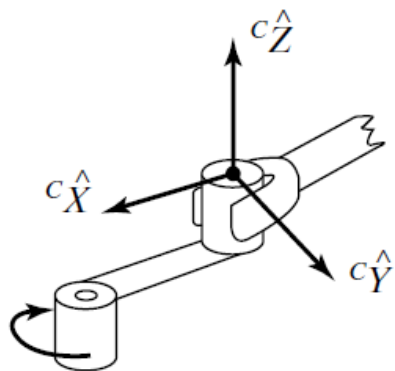
\mathbb{R}^6 中的2维平面

相互正交

\mathbb{R}^6 中的4维广义平面

定义一个广义表面，力约束沿该表面的切向，位置约束沿该表面的法向

部分约束任务中的控制坐标系



➤ **人工约束**（按自然约束下的期望运动或接触力建立）

位置约束

$${}^c v_y = r\alpha_1$$

$${}^c \omega_z = \alpha_1$$

力约束

$${}^c f_x = 0$$

$${}^c f_z = 0$$

$${}^c n_x = 0$$

$${}^c n_y = 0$$

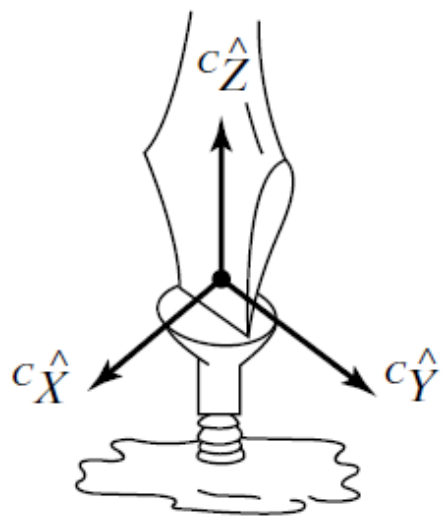
$$\begin{bmatrix} 0 \\ {}^c v_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ {}^c \omega_z \end{bmatrix} \text{ 正交于 } \begin{bmatrix} {}^c f_x \\ 0 \\ {}^c f_z \\ {}^c n_x \\ {}^c n_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

力约束沿广义表面的法向，位置约束沿广义表面的切向

部分约束任务中的控制坐标系

例：拧螺钉（准静态分析，忽略重力和某些摩擦力），考察对螺丝刀末端的约束

约束坐标系{C}是螺丝刀末端的联体坐标系



➤ 自然约束

位置约束

$${}^c v_x = 0$$

$${}^c v_z = 0$$

$${}^c \omega_x = 0$$

$${}^c \omega_y = 0$$

力约束

$${}^c f_y = 0$$

$${}^c n_z = 0$$

$${}^c f_x = 0$$

➤ 人工约束

位置约束

$${}^c v_y = 0$$

$${}^c \omega_z = \alpha_2$$

力约束

$${}^c f_z = \alpha_3$$

$${}^c n_x = 0$$

$${}^c n_y = 0$$

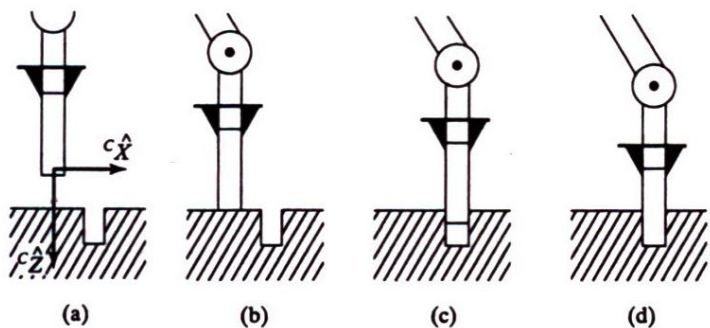
自然约束的力约束在 \mathbb{R}^6 定义了一个广义表面（4维）

自然力约束沿该表面的切向，自然位置约束沿该表面的法向

人工力约束沿该表面的法向，人工位置约束沿该表面的切向

人工约束需保持与自然约束的一致性

部分约束任务中的控制坐标系



➤ 例：考虑将销钉插入圆孔的装配任务。该装配序列可以分为多个子任务

(a) 销钉位于自由空间

自然约束 ${}^c\mathcal{F} = 0$

人工约束 ${}^c\boldsymbol{v} = [0 \quad 0 \quad v_{\text{approach}} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$

检测 ${}^c\hat{\boldsymbol{z}}$ 方向的力，若超过阈值，则进入 (b)

自然约束 ${}^c v_z = 0, {}^c \omega_x = 0, {}^c \omega_y = 0, {}^c f_x = 0, {}^c f_y = 0, {}^c n_z = 0$

人工约束 ${}^c v_x = v_{\text{slide}}, {}^c v_y = 0, {}^c \omega_z = 0, {}^c f_z = f_{\text{contact}}, {}^c n_x = 0, {}^c n_y = 0$

检测 ${}^c\hat{\boldsymbol{z}}$ 方向的速度，若超过阈值，则进入 (c)

自然约束 ${}^c v_x = 0, {}^c v_y = 0, {}^c \omega_x = 0, {}^c \omega_y = 0, {}^c f_x = 0, {}^c n_z = 0$

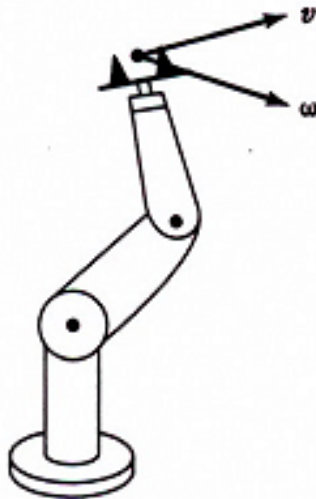
人工约束 ${}^c v_z = v_{\text{insert}}, {}^c \omega_z = 0, {}^c f_x = 0, {}^c f_y = 0, {}^c n_x = 0, {}^c n_y = 0$

检测 ${}^c\hat{\boldsymbol{z}}$ 方向的力，若超过阈值，则进入 (d) 结束任务

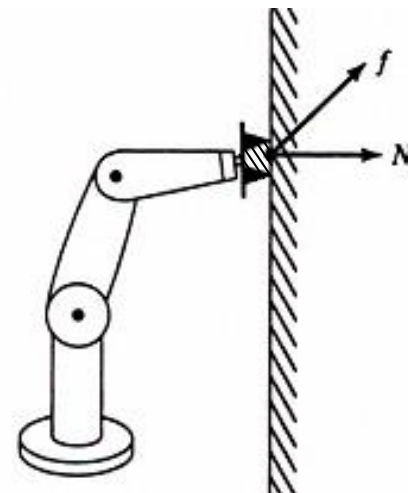
装配策略： 为完成任务而事先规划好的人工约束序列。策略需包含检测手段以检测接触状态的变化，并跟踪自然约束的变化。当自然约束变化时，要调用新的人工约束集并进行控制。

力/位混合控制问题

无接触状态，自然约束都是力约束，即所有约束力都是零，可以在6个自由度方向上运动。



末端执行器黏在墙面上，操作臂不能自由改变位置。有6个自然位置约束，可以在6个自由度上对目标施加力和力矩。



一般情况：在部分约束任务环境中进行力控制。需要在某些自由度进行位置控制，另一些自由度进行力控制。

力位混合控制器需要解决：

- 在存在自然力约束的方向进行操作臂的位置控制。
- 在存在自然位置约束的方向进行操作臂的力控制。
- 沿着任意坐标系 $\{C\}$ 的正交自由度方向进行任意位置和力的混合控制。

质量-弹簧系统的力控制

假设质量块与环境接触时，环境刚度为 k_e ，存在干扰力 f_{dist}

被控变量为施加到环境的接触力 f_e ，其期望值为 f_d

f_e 即为施加在弹簧上的力： $f_e = k_e x$

分析得到物理系统方程： $f = m\ddot{x} + k_e x + f_{dist}$

因此输入力与接触力的关系方程为

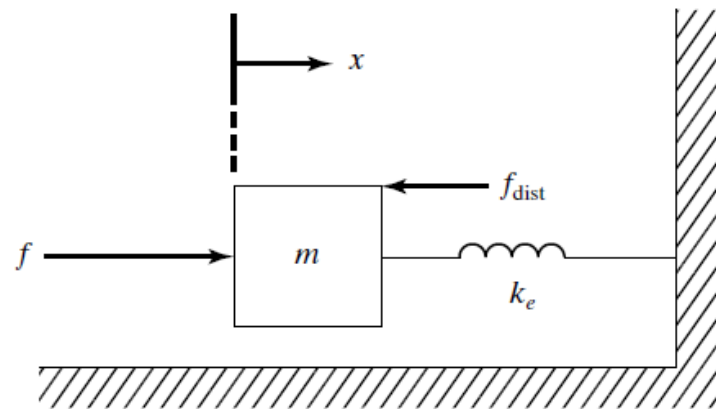
$$f = mk_e^{-1}\ddot{f}_e + f_e + f_{dist}$$

采用控制律分解方法进行反馈线性化： $f = \alpha f' + \beta$ ，取 $\alpha = mk_e^{-1}$ ， $\beta = f_e + f_{dist}$

令 $e_f = f_d - f_e$ ，设计控制律为： $f = mk_e^{-1}[\ddot{f}_d + k_{vf}\dot{e}_f + k_{pf}e_f] + f_e + f_{dist}$

由此得到误差线性系统： $\ddot{e}_f + k_{vf}\dot{e}_f + k_{pf}e_f = 0$

通常干扰力 f_{dist} 是未知的，因此，在控制律中可以舍去这一项。



质量-弹簧系统的力控制

(1) 如果控制律中不含干扰力 f_{dist} ，则实际控制律为： $f = mk_e^{-1}[\ddot{f}_d + k_{vf}\dot{e}_f + k_{pf}e_f] + f_e$

稳态分析：由稳态时，误差的各阶导数为零可得 $mk_e^{-1}k_{pf}e_f = f_{dist}$

令 $\alpha = mk_e^{-1}k_{pf}$ ，得到稳态误差为 $e_f = \frac{f_{dist}}{\alpha}$

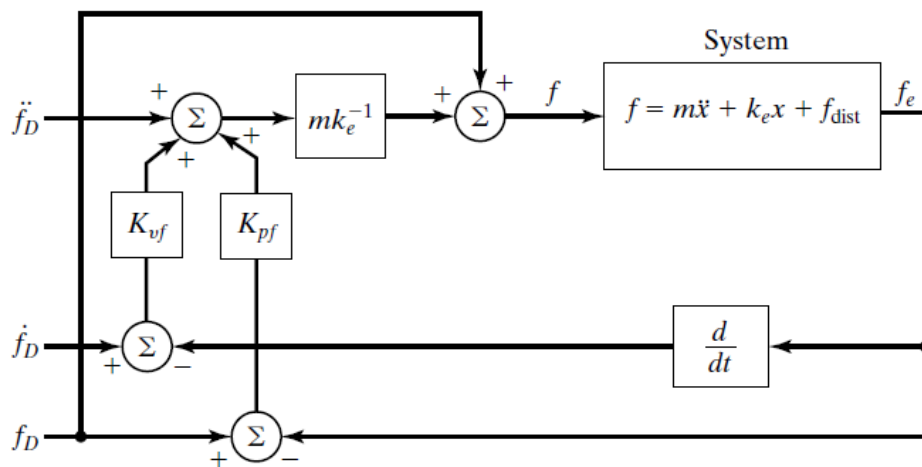
由于接触环境一般为刚性的， k_e 很大， α 很小，因此，该稳态误差一般较大，不能满足。

(2) 在控制律中用 f_d 代替 $f_e + f_{dist}$ ，则实际控制律为：

$$f = mk_e^{-1}[\ddot{f}_d + k_{vf}\dot{e}_f + k_{pf}e_f] + f_d$$

稳态分析： $mk_e^{-1}k_{pf}e_f + e_f = f_{dist}$

稳态误差： $e_f = \frac{f_{dist}}{1 + \alpha}$ 相对较优。



质量-弹簧系统的力控制

(3) 实用的力控制。

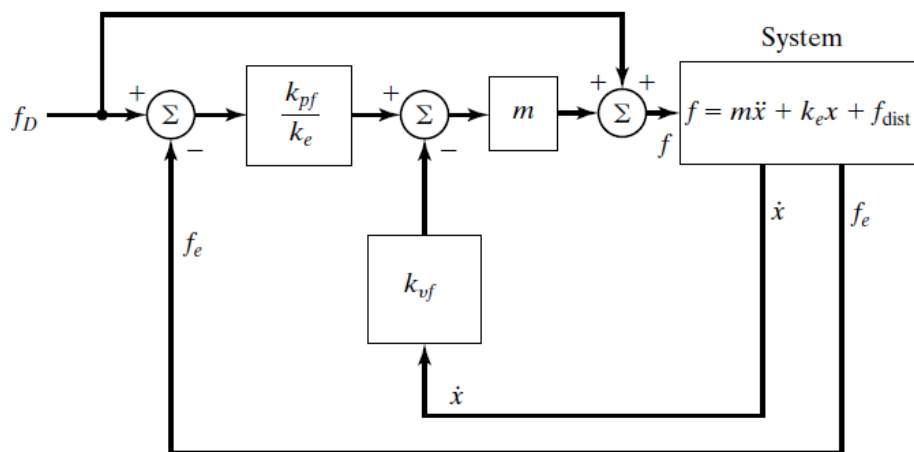
$$f = mk_e^{-1}[\ddot{f}_d + k_{vf}\dot{e}_f + k_{pf}e_f] + f_d$$

实际进行力控制时通常有以下情况：

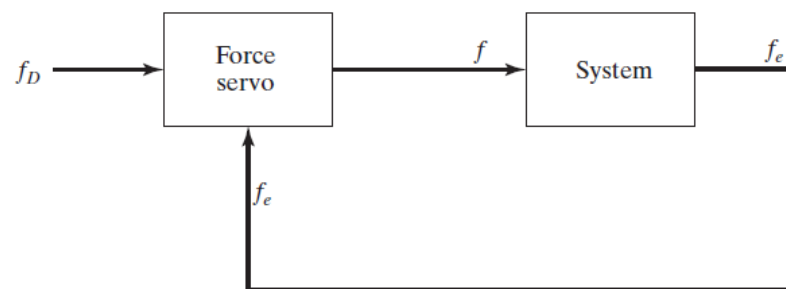
- 力轨迹一般为常值。
- 力检测的噪声很大，无法数值微分，可由 $\dot{f}_e = k_e \dot{x}$ 代替。

因此，可以通过机械臂的速度测量代替力的微分，实用的控制律为：

$$f = m[k_{pf}k_e^{-1}e_f - k_{vf}\dot{x}] + f_d$$



抽象的力控制伺服系统

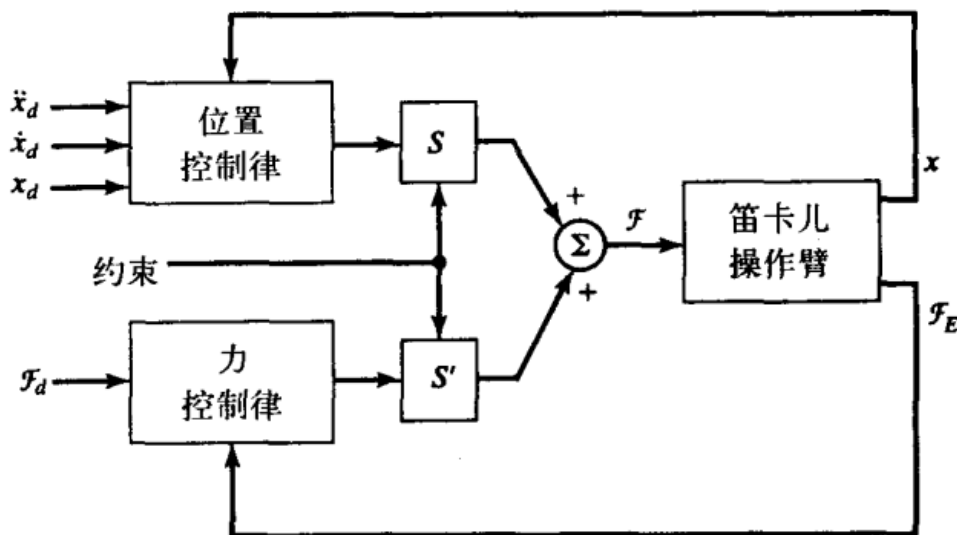
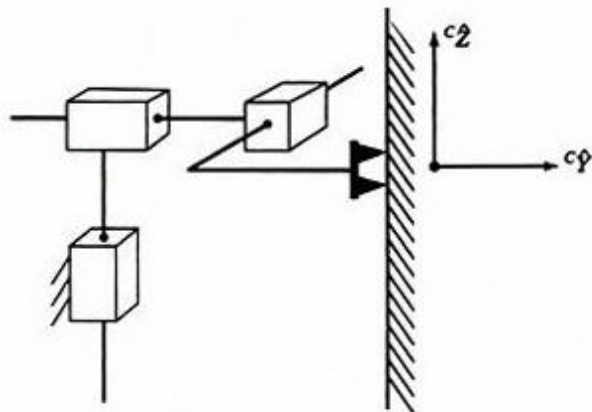


对于具有增益 k_{vf} 的内部速度环，力误差生成了一个设定值。

力/位混合控制方法

- 关节运动方向与约束坐标系 $\{C\}$ 一致的笛卡尔机械臂

例：



- 在Y方向需要力控制，在X和Z方向需要位置控制
- 关节1和3采用位置控制器，关节2采用力控制器

为了实现多种控制方式，引入对角矩阵来选择各个方向的控制模式：

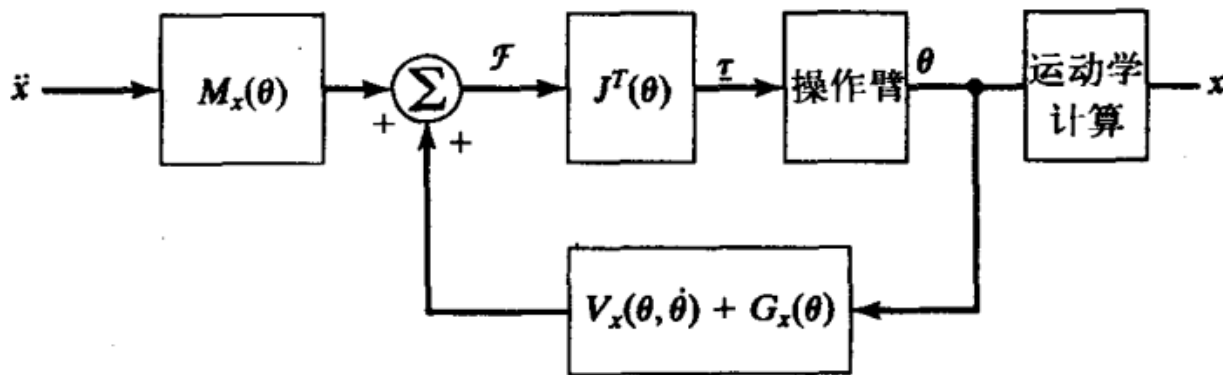
$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad S' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

力/位混合控制方法

➤ 一般操作臂的控制

笛卡尔空间解耦控制 $F = M_{\chi}(\Theta)\ddot{\chi} + V_{\chi}(\Theta, \dot{\Theta}) + G_{\chi}(\Theta)$

$$\tau = J^T(\Theta)F$$

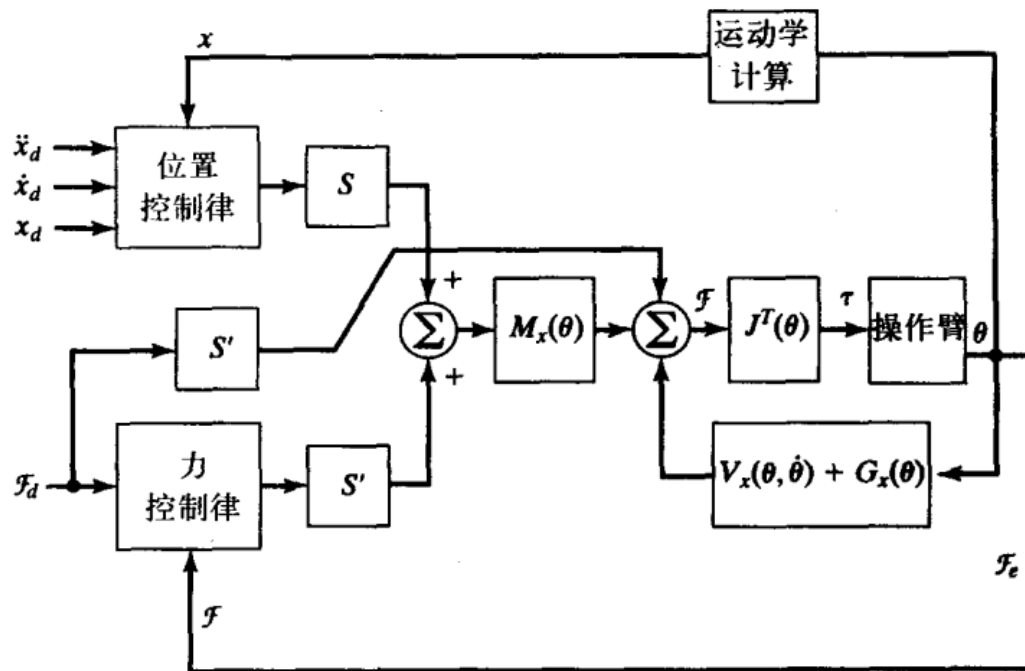


笛卡尔动力学方程和雅可比矩阵均在约束坐标系中描述，这样在每个笛卡尔自由度方向上均得到解耦的单位质量运动方程。

结合与约束坐标系一致的笛卡尔操作臂混合控制器，可以得到一般的力/位混合控制器。

力/位混合控制方法

➤ 一般操作臂的位/力混合控制策略



笛卡尔运动学方程、动力学方程和雅可比矩阵均应变换到约束坐标系中描述。

检测的力需要变换约束坐标系中表示。

伺服误差需在约束坐标系中计算。

力/位混合控制实验



7.2 阻抗控制



CONTROL SCIENCE AND ENGINEERING

SINCE 1956

阻抗控制策略

- 在许多情况下，交互过程往往伴随着能量的转移，这时单一的位置、速度或力控制就不足以控制交互过程的能量流动。
- **阻抗控制：**设计控制器使交互力与机械臂位置之间呈现出期望的关系，从而实现柔顺控制
 - 这种关系即机械阻抗，一般用一组质量-弹簧-阻尼系统表示
 - 不显式给出环境形变与接触力之间的关系
 - 适用于要求接触力“保持比较小的状态”，但不要求跟踪力轨迹的任务

阻抗控制策略

- 机械阻抗

定义：复频域内作用力与速度的比值 $F(s)/\dot{X}(s)$

假设一个质量-弹簧-阻尼系统可以用以下微分方程描述：

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F$$

则该系统的机械阻抗为 $Z(s) = \frac{F(s)}{V(s)} = Ms + B + \frac{K}{s}$

可以看出，机械阻抗是一个与频率相关的量，低频时的响应主要由弹性项（ K ）决定，而高频时的响应主要由惯性项（ M ）决定

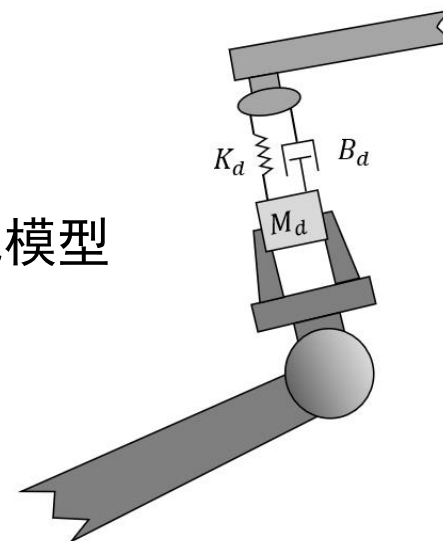
- 理想的位置控制器对应高阻抗，要外力干扰下维持运动状态不变
- 理想的力控制器对应低阻抗，要保持期望的作用力，不受位置变化的干扰
- 理想的位置控制器和力控制器可以看作阻抗控制在阻抗为无穷大或零时的特例
- 在实际中，机器人能够实现的阻抗范围是有限的

阻抗控制策略

用阻抗控制方法开门



简化模型



当存在环境不确定性和测量误差时，能够完成任务并保持交互的柔顺性。

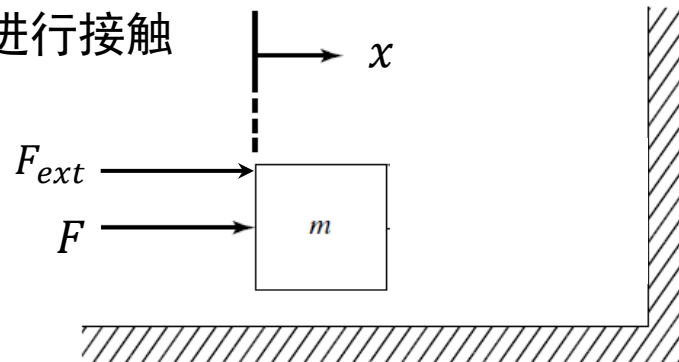
阻抗控制器设计

考虑一个简单的一自由度系统：一个质量块与环境进行接触

质量块的位移为 x ，质量为 m

F_{ext} 和 F 分别为环境施加的外力和控制力

质量块的运动方程为： $m\ddot{x} = F + F_{ext}$



质量块的期望轨迹为 $x_d(t)$ ，令 $\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t)$ 表示运动的跟踪误差，则阻抗控制的目标为：

$$M_d \ddot{\tilde{x}} + B_d \dot{\tilde{x}} + K_d \tilde{x} = F_{ext}$$

其中 M_d, B_d, K_d 分别表示期望的惯量、阻尼和刚度

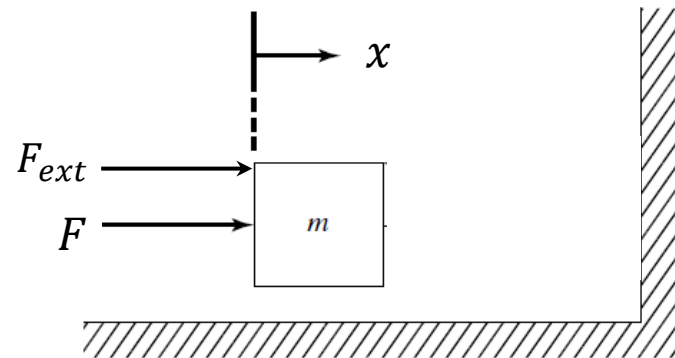
传感器测量当前位置与目标位置的偏差，并调整控制力的大小来达到预期的阻抗关系。阻抗控制律可以表示为：

$$F = m\ddot{x}_d + (m - M_d)\ddot{\tilde{x}} - (B_d \dot{\tilde{x}} + K_d \tilde{x})$$

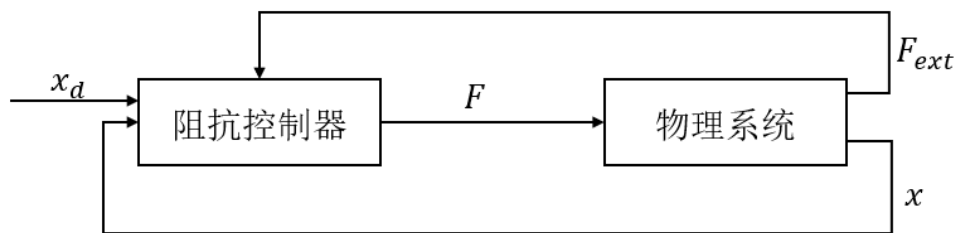
阻抗控制器设计

上式中出现了跟踪误差的二阶导数，在实际系统中会引入严重的测量噪声。通过测量外力，可以将控制律改为：

$$F = m\ddot{x}_d - \frac{m}{M_d}(B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x}) + \left(\frac{m}{M_d} - 1\right)F_{ext}$$



阻抗控制框图



- 控制器输入为运动信号，输出为力信号，因此控制器表现为机械阻抗
- 物理系统输入为力信号而输出运动信号，表现出导纳的特性

分析雅可比

- 几何雅可比矩阵 $\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = J(\Theta)\dot{\Theta}$
- 分析雅可比 $J_a(\Theta)$, 基于对末端执行器姿态的最小表示

令 $X = \begin{bmatrix} d(\Theta) \\ \alpha(\Theta) \end{bmatrix}$ 表示末端执行器的姿态, 其中 $d(\Theta)$ 为基座坐标系原点到末端执行器坐标系原点的一般向量, α 为末端执行器坐标系相对于基座坐标系姿态的最小表示 (例如欧拉角)。

分析雅可比满足以下形式:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = J_a(\Theta)\dot{\Theta}$$

- 以zyz欧拉角为例。可以证明, 若 $R = R_{z,\phi}R_{y,\theta}R_{z,\psi}$ 为欧拉角变换, 角速度与欧拉角微分的关系为:

$$\omega = \begin{bmatrix} c_\psi s_\theta \dot{\phi} - s_\psi \dot{\theta} \\ s_\psi s_\theta \dot{\phi} + c_\psi \dot{\theta} \\ \dot{\psi} + c_\theta \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\psi s_\theta & -s_\psi & 0 \\ s_\psi s_\theta & c_\psi & 0 \\ c_\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = B(\alpha)\dot{\alpha}$$

分析雅可比

- 几何雅可比与分析雅可比矩阵的转换

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = J(\Theta) \dot{\Theta}$$

$$J(\Theta) \dot{\Theta} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ B(\alpha) \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & B(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & B(\alpha) \end{bmatrix} J_a(\Theta) \dot{\Theta}$$

$$J_a(\Theta) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & B^{-1}(\alpha) \end{bmatrix} J(\Theta) \quad \text{要求 } B \text{ 矩阵可逆}$$

机械臂动力学

- 关节空间动力学 $M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) = \tau + J^T(\Theta)F$

使用分析雅可比矩阵: $M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) = \tau + J_a^T(\Theta)F_a$

其中 $F_a = T_a^{-T}(\alpha)F$ 表示对 \dot{X} 做功的广义力

- 笛卡尔空间动力学

$$M_X(\Theta)\ddot{X} + V_X(\Theta, \dot{\Theta}) + G_X(\Theta) = J_a^{-T}(\Theta)\tau + F_a$$

其中

$$M_X(\Theta) = J_a^{-T}(\Theta)M(\Theta)J_a^{-1}(\Theta) = \left(J_a(\Theta)M^{-1}(\Theta)J_a^T(\Theta) \right)^{-1}$$

$$V_X(\Theta, \dot{\Theta}) = J_a^{-T}(\Theta)V(\Theta, \dot{\Theta}) - M_X(\Theta)\dot{J}_a(\Theta)$$

$$G_X(\Theta) = J_a^{-T}(\Theta)G(\Theta)$$

机械臂阻抗控制器

$$M_X(\Theta)\ddot{X} + V_X(\Theta, \dot{\Theta}) + G_X(\Theta) = J_a^{-T}(\Theta)\tau + F_a$$

- 笛卡尔空间反馈线性化（需要测量力）

$$\tau = J_a^T(\Theta) \left[M_X(\Theta)a + V_X(\Theta, \dot{\Theta}) + G_X(\Theta) - F_a \right]$$

➡ $\ddot{X} = a$ 闭环系统线性化为单位质量系统

- 设计期望动态阻抗模型

$$M_m(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + D_m(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_m(X - X_d) = F_a$$

↑
期望惯量
(>0)
↑
期望阻尼
(≥0)
↑
期望刚度
(>0)
↑
环境外力

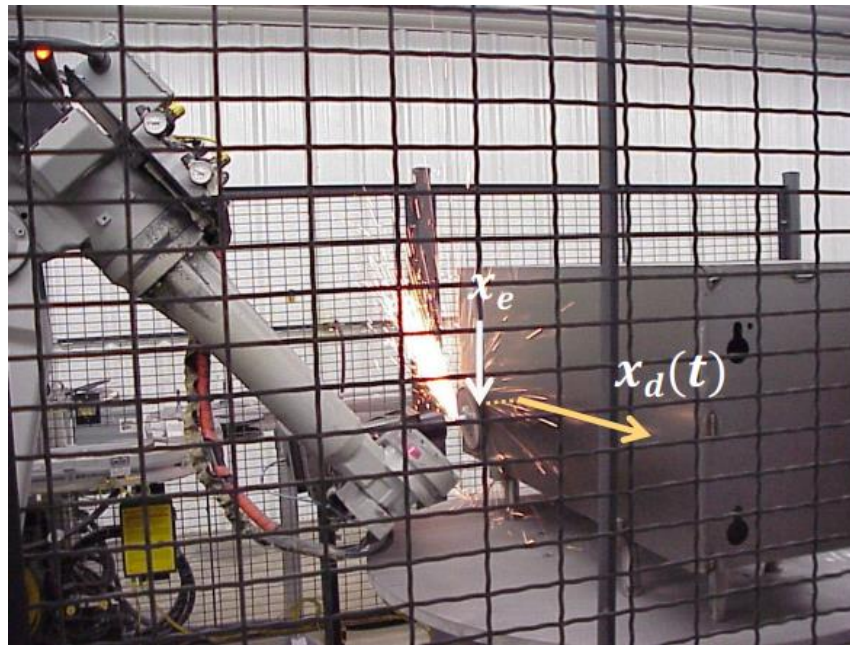
- $X_d(t)$ 为期望运动轨迹
- 通常期望惯量、阻尼和刚度矩阵都取为对角阵，以将各个分量解耦
- 可通过设定 $a = \ddot{X}_d + M_m^{-1} \left[D_m(\dot{X}_d - \dot{X}) + K_m(X_d - X) + F_a \right]$ 实现

机械臂阻抗控制器

- $X_d(t)$ 选取

$$M_m(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + D_m(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_m(X - X_d) = F_a$$

在打磨、抛光等任务中，期望轨迹 $X_d(t)$ 会略微设定在环境表面之内，使末端执行器与环境保持接触。



机械臂阻抗控制器

- $X_d(t)$ 选取

$$M_m(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + D_m(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_m(X - X_d) = F_a$$

在一些人机交互任务中，期望位姿 $X_d(t)$ 是一个常量，设定了机器人在自由空间中的静息位置。



ES π Control joint-level

In order to further increase the compliance of the system we lower the apparent stiffness in each joint for the following demonstration.



机械臂阻抗控制器

- 阻抗参数选取原则

- 以**互补**的方式匹配环境的动态特征（特别是环境阻抗的估计值）
- 避免**环境的未知几何特征造成的**大冲击力**，防止机械系统的损坏
- 模仿人类手臂的动作：自由运动时快速、刚性，在有限制的环境中慢速、柔性



- 在预期会与环境发生接触的方向上选择较大的 $M_{m,i}$ 和较小的 $K_{m,i}$ ，使得接触力不会太大
- 在预期能够自由运动的方向上选择较小的 $M_{m,i}$ 和较大的 $K_{m,i}$ ，以减小轨迹跟踪的误差
- 阻尼系数 $D_{m,i}$ 可以调节暂态特性

机械臂阻抗控制器

- 关节空间控制律

$$\tau = M(\Theta)J_a^{-1}(\Theta)\left\{\ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Theta)\dot{\Theta} + M_m^{-1}\left[D_m(\dot{X}_d - \dot{X}) + K_m(X_d - X)\right]\right\} \\ + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) + J_a^T(\Theta)\left[M_X(\Theta)M_m^{-1} - I\right]F_a$$

测量接触力的权重矩阵

- 可以通过

$$J_a^T(\Theta)\left[M_X(\Theta)M_m^{-1} - I\right]F_a = \left[M(\Theta)J_a^{-1}(\Theta)M_m^{-1} - J_a^T(\Theta)\right]F_a$$

来消除控制律中的笛卡尔空间量

- 一般任务中关注机械臂末端执行器与环境的交互，因此阻抗模型一般定义在笛卡尔空间，但最终的控制实现还是在关节空间。

机械臂阻抗控制器

如果在设计阻抗控制律时将期望的惯量矩阵取为机械臂的笛卡尔惯量矩阵：

$$M_m = M_X(\Theta) = J_a^{-T}(\Theta)M(\Theta)J_a^{-1}(\Theta) = \left(J_a(\Theta)M^{-1}(\Theta)J_a^T(\Theta) \right)^{-1}$$

则控制律为：

$$\begin{aligned} \tau = & M(\Theta)J_a^{-1}(\Theta)\left\{ \ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Theta)\dot{\Theta} \right\} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) \\ & + J_a^T(\Theta)\left[D_m\left(\dot{X}_d - \dot{X} \right) + K_m\left(X_d - X \right) \right] \end{aligned}$$

消除了接触力反馈项（不再需要力/力矩传感器）

- 控制律只与运动信息有关，但仍然能保持较小的环境接触力
- 阻抗模型变为非线性，不能表示实际物理模型
- 需要根据环境刚度选择适当的 K_m

导纳控制

- 阻抗控制基于测量的位置来控制外力，需要直接对关节力矩进行控制，但很多机械臂不开放底层力矩控制接口
- 此时可以使用导纳控制来实现与环境接触时的阻抗特性。导纳控制**基于测量的外力来控制位置**，只需要发送位置/速度指令

考虑之前的一自由度模型。在导纳控制器中，环境力 F_{ext} 通过二阶导纳模型生成一个附加的运动信号，将预期的运动轨迹 x_d 变为新的运动轨迹 x_m ，来达到控制目标。一种简单的方法是根据

$$M_d(\ddot{x}_m - \ddot{x}_d) + B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x} = F_{ext}$$

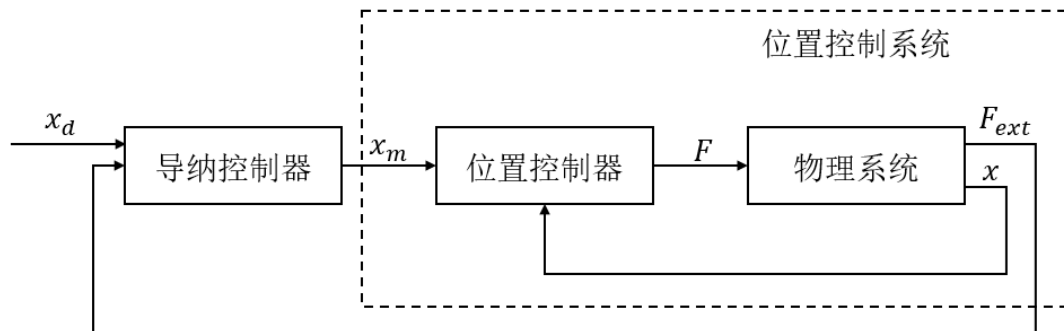
来计算所需的加速度，求解得到：

$$\ddot{x}_m = \ddot{x}_d + \frac{1}{M_d}(F_{ext} - B_d\dot{\tilde{x}} - K_d\tilde{x})$$

对所求得的加速度做两次积分，得到新的运动轨迹并送入位置控制环，来完成最终的控制。

导纳控制

- 导纳控制中，物理系统接收位置输入，表现出机械阻抗的特性；控制器可以被视为机械导纳，测量环境力并给出运动信号。
- 导纳控制必须有环境接触力反馈，因此机械臂需要装备力/力矩传感器



导纳控制框图

控制方法对比

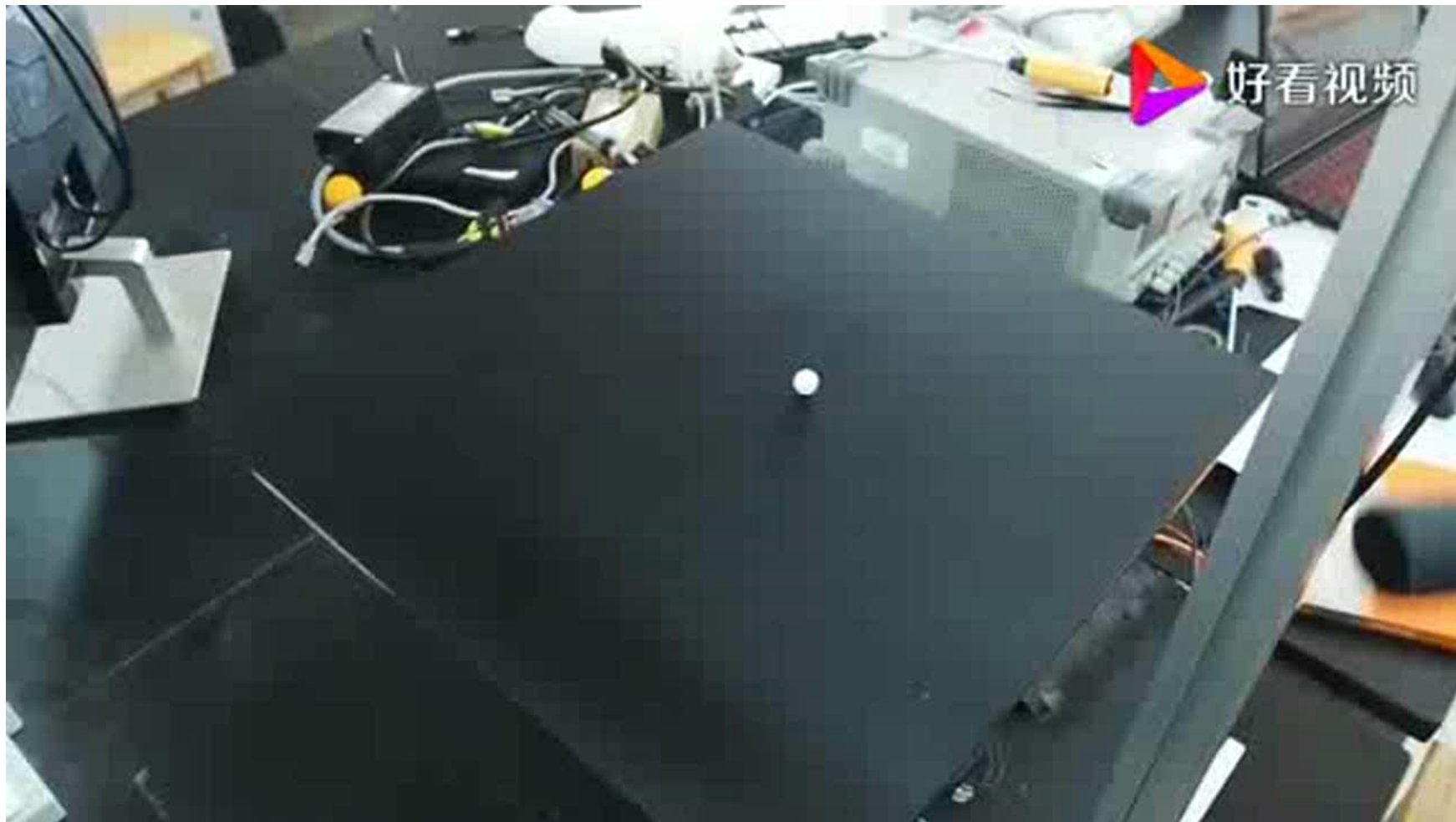
阻抗控制

- 环境 = 发生微小有限形变的机械系统
- 两个耦合动态系统（机器人和环境）之间的交互产生了接触力
- 控制器指定力与运动之间的动态关系

力位混合控制

- 机器人与刚性环境的接触限制了机器人的运动自由度
- 机器人试图违反环境施加的几何约束，因此受到接触力
- 任务空间被划分为正交的子空间，分别在其中进行力控制和运动控制

基于视觉的机器人控制实验



Thanks!